

## КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

<sup>1,2</sup>Хомутов А.В., <sup>1</sup>Бабкина Е.А., <sup>1</sup>Бабкин Е.М., <sup>1</sup>Данько М.М., <sup>1</sup>Иванов В.И., <sup>1</sup>Королева Е.С.,  
<sup>1,2</sup>Лейбман М.О., <sup>2</sup>Нестерова Н.Б., <sup>1</sup>Опокина О.Л., <sup>1</sup>Слагода Е.А., <sup>1</sup>Факашук Н.Ю., <sup>1</sup>Хайруллин Р.Р.

<sup>1</sup> Институт криосферы Земли, Тюмень, Россия; akhomutov@gmail.com

<sup>2</sup> Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

В 2021 г. продолжен комплексный мониторинг глубины сезонного протаивания, температуры многолетнемерзлых пород, активности криогенных процессов, связанных с вытаиванием подземных льдов на нескольких участках севера Западной Сибири: на полуострове Ямал, севере Пур-Тазовского междуречья и севере Гыданского полуострова. Для проведения мониторинга применяются комплексные методы полевых исследований, совмещающие с аналитической обработкой данных дистанционного зондирования.

Ключевые слова: *глубина протаивания, многолетнемерзлые породы, пластовые льды, полигонально-жильные льды, полигональные торфяники, термоденудация, термоцирки*

**Введение.** Наиболее часто при мониторинге геокриологических условий используются наблюдения за динамикой глубины протаивания и температуры пород, которые проводятся многими исследователями достаточно давно и на многих стационарах [Лейбман, 2001; Мельников и др., 2005; Дроздов и др., 2010; Romanovsky et al. 2010; Biskaborn et al. 2019 и многие другие]. В том числе этому способствуют Международные программы циркумполярного мониторинга сезонноталого слоя (CALM) [Brown et al. 2000] и термического состояния многолетнемерзлых пород (TSP) [Romanovsky et al. 2010]. В рамках этих программ применяется единый протокол измерения глубины сезонного протаивания (в случае с CALM) или единая приборная база, как в случае с TSP. Это позволяет использовать весь массив получаемых данных для анализа происходящих изменений с многолетнемерзлыми породами и определять тренды возможных будущих изменений [Biskaborn et al. 2019], а также моделировать состояние многолетнемерзлых пород в будущем [Nikolsky, Romanovsky, 2018]. Однако, проводимый мониторинг геокриологических условий не всегда сопровождается мониторингом криогенных процессов, динамика или даже возникновение которых может сильно зависеть от направленности изменений состояния многолетнемерзлых пород [Бабкина и др., 2019]. Поэтому возникает острая необходимость комплексного мониторинга геокриологических условий и криогенных процессов на отдельных территориях, где климатические колебания приводят к существенному увеличению активности криогенных процессов (термоденудации, термоэрозии, термокарста, комплексной деструкции), особенно в районах распространения подземных пластовых и полигонально-жильных льдов.

**Район исследований.** Комплексный мониторинг геокриологических условий и криогенных процессов проводится на севере Западной Сибири на базе трех стационарных участков (Рис. 1).

Научно-исследовательский стационар (НИС) «Васькины Дачи», расположенный в центральной части полуострова Ямал в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, основан в 1988 г. Основные объекты длительного мониторинга – глубина сезонного протаивания и температура пород в скважинах на нескольких мониторинговых площадках. Стационар служит опорной базой для изучения склоновых криогенных процессов. Благодаря стационарным наблюдениям удалось разработать теорию криогенного оползания и на её основе предположить подтвердившуюся впоследствии смену механизмов оползания при потеплении. С 2012 г. проводится ежегодный мониторинг развития термоцирков, образующихся в результате вытаивания подземных льдов и сильнольдистых мерзлых пород на склонах, имеющих базис эрозии в озерных котловинах.



Рис. 1. Район исследований на севере Западной Сибири; 1 – стационары и полигоны, 2 – охват дистанционными исследованиями

С 2016 г проводятся регулярные геокриологические исследования в северной части Пур-Тазовского междуречья (полигон «Тазовский») и на севере Гыданского полуострова (полигон «Гыда»). Начало исследованиям положено рекогносцировочными работами в районе пос. Тазовский и обустройством площадок наблюдений в районе с. Гыда в рамках реализации Программы комплексного изучения Гыданского полуострова.

Основными объектами комплексных геокриологических исследований на полигоне «Тазовский» выступают полигональные торфяники с полигонально-жильными льдами (ПЖЛ). Главная цель проводимых исследований – оценка устойчивости мерзлых полигональных торфяников к антропогенному воздействию на фоне меняющегося климата Арктики. Наряду с мониторингом глубины сезонного протаивания и температуры пород в различных условиях, в том числе при антропогенном влиянии, проводится мониторинг изменения рельефа вследствие вытаивания ПЖЛ, изучение морфологии ПЖЛ и криолитологического строения вмещающих отложений, особенностей строения и динамики сезонно-талого слоя в торфяниках.

Полигон «Гыда» организован с целью расширения сети наблюдений за геокриологическими условиями. С начала наблюдений в 2016 г ежегодно наращивалось количество площадок наблюдений за глубиной сезонного протаивания в разных ландшафтных условиях, изучались морфология ПЖЛ и криолитологическое строение вмещающих пород в разрезах береговых обнажений террасы р. Гыда.

Дистанционными исследованиями с применением как мозаик космических снимков свободного доступа, так и снимков сверхвысокого разрешения на локальные участки покрыта значительная часть полуостровов Ямал и Гыданский.

**Методы исследований.** Исследования на стационарных участках включают в себя классические методы измерения глубины протаивания металлическими щупами, непрерывные наблюдения за температурой пород в скважинах с применением оборудования НОВО (<https://www.onsetcomp.com>) и KrioLab (<https://kriolab.ru>).

Динамика криогенных процессов на локальном уровне, в частности темпы развития термоцирков и изменение рельефа полигональных торфяников в результате деградации ПЖЛ, оценивается наземными (GPS-съемка разного уровня точности, съемка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)) и дистанционными методами с применением космических снимков сверхвысокого разрешения (GeoEye-1, QuickBird, WorldView-2, 3 и др.).

Геологические разрезы, в том числе в обнажениях термоцирков и полигональных торфяников, и керны скважин изучаются классическими методами криолитологии с отбором необходимых проб и монолитов пород и льдов для различных лабораторных исследований, включающих изотопный, геохимический, грануло-минералогический анализы, радиоуглеродное датирование и др.

Для бурения скважин в 2016, 2020-2021 гг. использовались установки колонкового бурения УКБ 12/25И. Оборудованные ранее скважины были подготовлены с использованием мотобура, скважины незначительной глубины (до 1,5 м) – с помощью ручных буров.

Динамика криогенных процессов на региональном уровне оценивается и интерпретируется по массивам космических снимков свободного доступа. Например, была проведена идентификация всех термоцирков, находящихся в активном или относительно стабильном состоянии на всей территории полуостровов Ямал и Гыданский по сервису Яндекс.Карты [Нестерова и др., 2021 в печати]. Методически эта работа стала возможной в результате накопления данных полевого мониторинга термоцирков на НИС «Васькины Дачи» в период 2012-2020 гг. [Khomutov et al. 2017; Хомутов и др., 2021].

#### **Предварительные результаты полевых исследований 2021 г.**

*Температура пород.* Одной из масштабных задач на полевой сезон 2021 г было расширение сети мониторинга за температурой многолетнемерзлых пород, необходимое в сочетании с продолжением многолетних рядов наблюдения за сезонноталым слоем для уточнения существующих и разработки современных моделей развития криолитозоны в условиях современных изменений климата и антропогенного влияния. Пробные скважины (7-13 м) в рамках этой задачи были подготовлены в сентябре 2020 г на одном из участков комплексного мониторинга полигональных торфяников полигона «Тазовский». За летне-осенний период 2021 г было подготовлено еще 6 скважин: 3 глубиной 15 м на НИС «Васькины Дачи» и 3 глубиной 12-15 м в пределах полигона «Тазовский».

Предварительное сравнение полученных температурных данных с имеющимися данными по скважинам с рядом наблюдений год и более показало как сходство, так и различия в зависимости от ландшафтных условий положения скважин и их геологического разреза. Так на НИС «Васькины Дачи» более низкие температуры характерны для скважин, расположенных на вершинных, водораздельных поверхностях или в верхних частях склонов (ВД-2, CALM, LGT, Рис. 2а). Для скважины ВД-торфяник характерна небольшая мощность торфа (около 1,5 м) с преобладанием песчаных отложений ниже по разрезу, только с 12 м ниже вскрываются суглинки. Также этот торфяник испытывает влияние оврага, в верховьях которого расположен. В связи с этим температура пород до глубины 15 м не опускается ниже  $-3,2^{\circ}\text{C}$ , тогда как в скважине ЛК-06, несмотря на близость водного объекта и озерно-болотные отложения в разрезе, на глубинах 6-8 м температура пород близка к  $-4,0^{\circ}\text{C}$ .

Большая часть скважин полигона «Тазовский» (Рис. 2б) заложены на полигональных торфяниках, но с разными условиями, разной мощностью торфа, а одна из скважин (С6-21) заложена в торфянике уже в лесотундровой зоне в 15 км южнее остальных скважин, расположенных в торфяниках южной тундры. Прослеживается увеличение температуры пород при продвижении в южном направлении и уменьшении мощности торфа (от 3,6 м в скважине С4-20 до 0,9 м в С6-21), а также усилении техногенного влияния, приводящего к деградации полигонально-жильной системы торфяника. Температура пород (скв. С3-20) более северного торфяника с мощностью торфа 4,3 м, но расположенного рядом с автодорогой на торфяном полигоне, окруженном оврагами, возникшими в результате вытаивания ПЖЛ, практически совпадает с температурой в скважине С6-21 на более южном и маломощном торфянике. При

этом температура в этих 2 скважинах на глубине ниже 4 м выше зафиксированных в скважине С1-16, вскрывающей супесчано-суглинистые породы водораздельной поверхности.

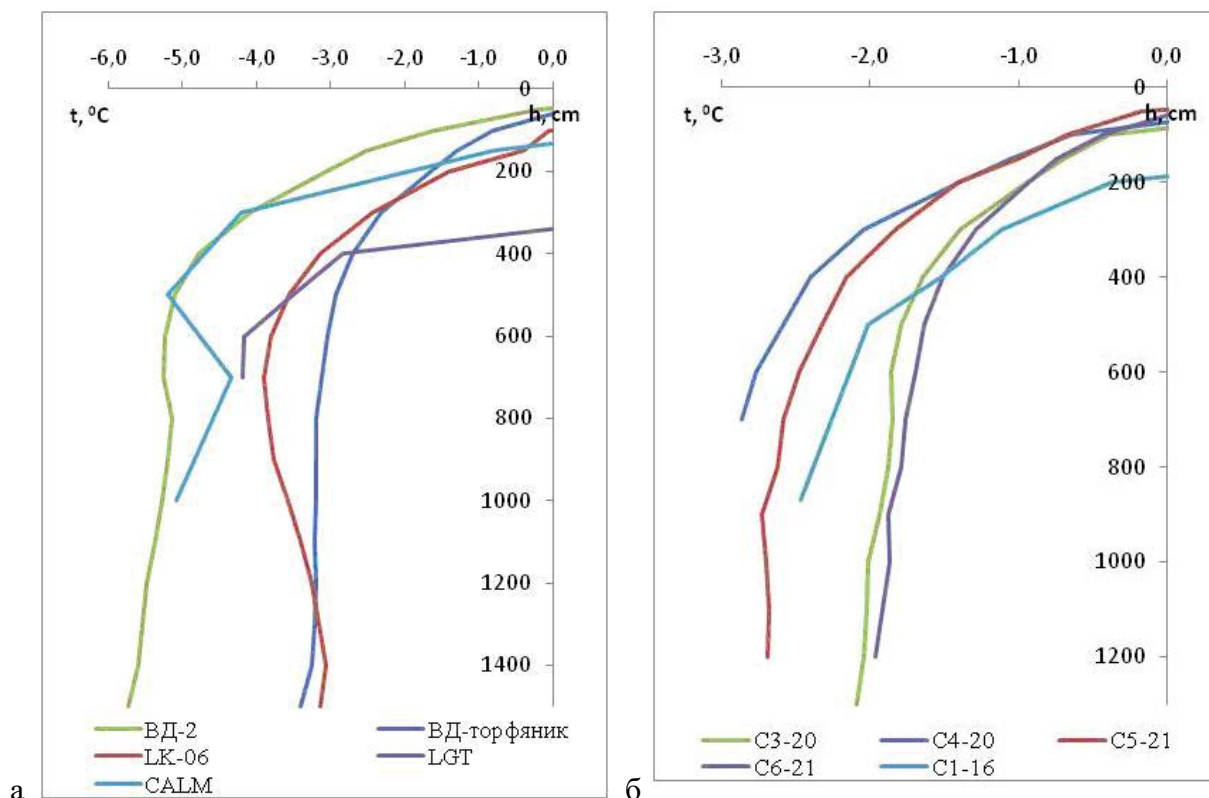


Рис. 2. Температура пород в скважинах НИС «Васькины Дачи» на конец августа 2021 г (а), полигона «Газовский» на середину сентября 2021 г (б)

Табл. 1. Объемы выноса материала из термоцирков НИС «Васькины Дачи» по результатам вычисления ЦМР

Термоцирк	Дата ЦМР		Объем вытаивания, м <sup>3</sup>
	первоначальная	актуальная	
ТЦ-1	20.07.2019	19.08.2019	1707
ТЦ-2	24.08.2017	31.07.2021	618
ТЦ-2м	19.08.2020	31.07.2021	6556
ТЦ-3	28.08.2017	08.08.2021	1178
ТЦ-4а	28.08.2017	25.08.2021	6550
ТЦ-5	28.08.2017	25.08.2021	10377
ТЦ-5н	28.08.2017	25.08.2021	61235
ТЦ-6	28.08.2017	06.08.2021	2948

*Термоцирки.* В рамках мониторинга развития термоцирков на территории НИС «Васькины Дачи» по результатам применения регулярной БПЛА-съемки проведена попытка оценить объемы выноса из термоцирков материала, состоящего из подземных льдов и сильнольдистых мерзлых пород. В результате сопоставления цифровых моделей рельефа (ЦМР) для каждого термоцирка за соответствующие периоды получены следующие данные (Табл. 1).

Для расчета у 6 термоцирков, имеющих ЦМР 2017 и 2021 г, принят условно единый расчетный период 4 года (между датами ЦМР). Общий объем вынесенного материала за условный расчетный период составил 82906 м<sup>3</sup> или в перерасчете на 1 условный термоцирк –

3454 м<sup>3</sup>/год. Таким образом, основываясь на числе выделенных по дистанционным данным 86 активных термоцирков на полуострове Ямал [Нестерова и др., 2021], общий объем выносимой породы приближается к 300 тыс м<sup>3</sup> в год.

**Благодарности.** Исследования проводятся в рамках выполнения совместного с Научным центром изучения Арктики проекта «Прогноз деградации мерзлоты и технология автоматизированного контроля несущей способности мерзлых грунтов под объектами капитального строительства», при поддержке Правительства ЯНАО и Российского центра освоения Арктики (в рамках задач Западно-Сибирского НОЦ мирового уровня), а также при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60222 (в 2018-2020 гг), РФФИ и Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках научных проектов №№ 18-45-890013 (2018 г) и 19-45-890011 (с 2019 г). Методические подходы разрабатываются при выполнении работы по госзаданию № 121041600042-7.

## ЛИТЕРАТУРА

Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факащук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. 2019. № 4. С. 99–109.

Дроздов Д.С., Украинцева Н.Г., Царев А.М., Чекрыгина С.Н. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 1. С. 22–31.

Лейбман М.О. Динамика слоя сезонного оттаивания пород и методика измерения его глубины в различных ландшафтах Центрального Ямала // Криосфера Земли. 2001. Т. 5. № 3. С. 17–24.

Мельников Е.С., Васильев А.А., Лейбман М.О., Москаленко Н.Г. Динамика сезонноталого слоя в Западной Сибири // Криосфера Земли. 2005. Т. 9. № 2. С. 23–32.

Нестерова Н.Б., Хомутов А.В., Лейбман М.О., Сафонов Т.А., Белова Н.Г. Инвентаризация термоцирков на севере Западной Сибири по данным мозаики спутниковых снимков 2016-2018 гг. // Криосфера Земли. 2021. Т. 25. № 6. С. 41–50.

Хомутов А.В., Хайруллин Р.Р., Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Нестерова Н.Б. Распространение и активность термоденудационных процессов на Центральном Ямале по полевым и дистанционным данным. // Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии. А.Н. Федоров (отв. ред.) Якутск, Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2021, с. 76–78.

Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nat. Commun. 2019. 10, 264. doi:10.1038/s41467-018-08240-4

Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: Research designs and initial results // Polar Geogr., 2000. Vol. 24. Is. 3. P. 166–258. doi:10.1080/10889370009377698

Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Yu., Gubarkov A., Mullanurov D., Khairullin R. Activation of cryogenic earth flows and formation of thermocirques on Central Yamal as a result of climate fluctuations. /In: Advancing Culture of Living with Landslides. K. Mikos et al. (eds.) — Ljubljana, Springer, 2017, pp. 209—216. doi: 10.1007/978-3-319-53483-1\_24

Nicolosky D.J., Romanovsky V. E. Modeling long-term permafrost degradation // Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2018, 123, pp. 1756—1771.

Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkov G.V., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichinsky D.A., Vasiliev A.A. Thermal state of permafrost in Russia // Permafr. Periglac. Process. 2010ю Vol. 21. Is. 2, P. 136-155. doi: 10.1002/ppp.683

## **COMPLEX MONITORING OF GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS AND CRYOGENIC PROCESSES IN THE NORTH OF WEST SIBERIA**

<sup>1,2</sup>*Khomutov A.V., <sup>1</sup>Babkina E.A., <sup>1</sup>Babkin E.M., <sup>1</sup>Danko M.M., <sup>1</sup>Ivanov V.I., <sup>1</sup>Koroleva E.S., <sup>1,2</sup>Leibman M.O., <sup>2</sup>Nesterova N.B., <sup>1</sup>Opokina O.L., <sup>1</sup>Slagoda E.A., <sup>1</sup>Fakashuk N.Yu., <sup>1</sup>Khairullin R.R.*

<sup>1</sup> Earth Cryosphere Institute, Tyumen, Russia; akhomutov@gmail.com

<sup>2</sup> University of Tyumen, Tyumen, Russia

Complex monitoring of active layer depth, permafrost temperature, cryogenic processes activity due to ground ice thaw on several key sites of the north of West Siberia: Yamal Peninsula, north of Pur-Taz interfluvium and the north of Gydan Peninsula was ongoing in 2021. Monitoring was carried out by a complex of field methods combined with analysis of remote sensing data.

Keywords: *active layer depth, permafrost, tabular ground ice, ice wedges, polygonal peatlands, thermodenudation, thermocirques*